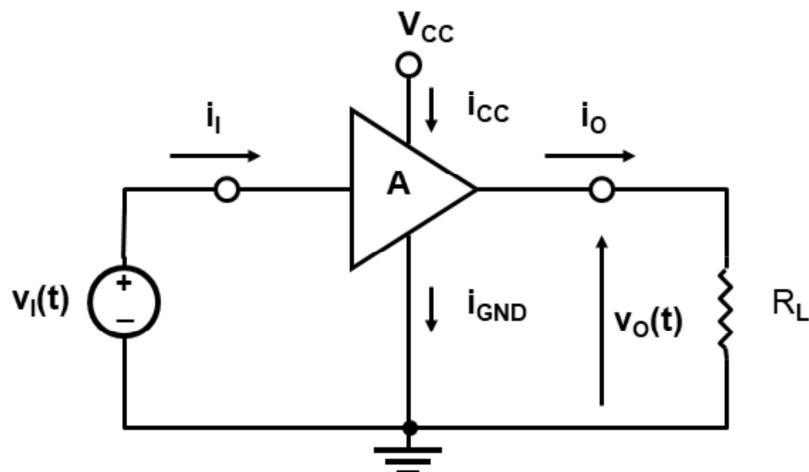




# L' amplificatore



Il blocco amplificatore realizza la funzione di elevare il livello (di tensione o corrente) del segnale (in tensione o corrente) in uscita da una sorgente.

Nel caso, come riportato in figura, il segnale in ingresso e di uscita siano delle tensioni, l' amplificatore si dice di tensione.

Un tipico schema circuitale vede l' ingresso dell' amplificatore pilotato da un generatore e l' uscita collegata ad un bipolo di carico.

In questo caso, dato che il segnale in ingresso è una tensione riferita a massa, l' amplificatore viene denominato **“single ended”**

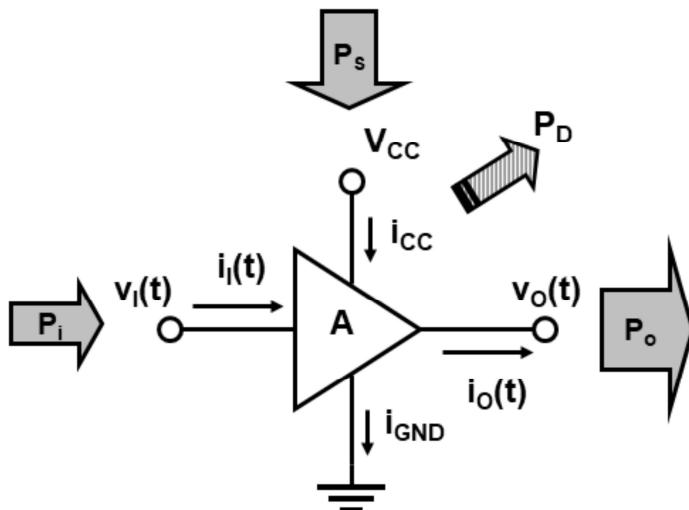
In generale la potenza trasferita al carico è molto maggiore di quella assorbita dalla sorgente

La potenza aggiuntiva viene fornita da un generatore di tensione continua  $V_{CC}$  (alimentatore).

In altri casi l' amplificatore può essere alimentato da una coppia di alimentatori, uno a tensione positiva ed uno a tensione negativa (alimentazione duale).



# Bilancio energetico



Il bilancio di potenza deve essere ovviamente nullo e quindi

$$P_s + P_I = P_o + P_D$$

In particolare, se non sono presenti elementi reattivi, in ogni istante vale:

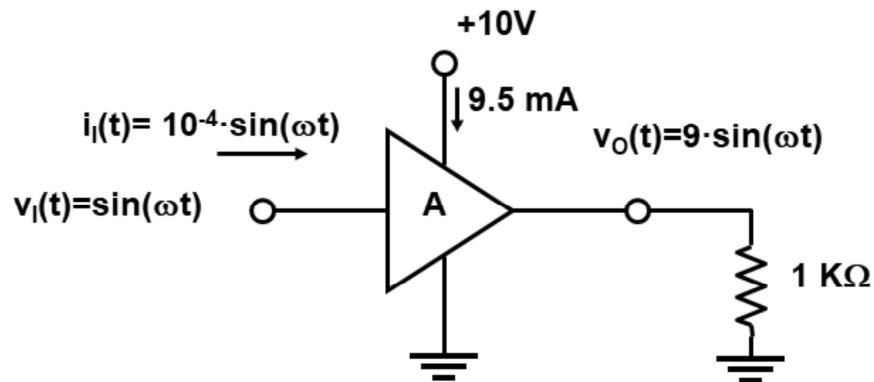
$$V_{CC} \cdot i_{cc} + v_I \cdot i_I = v_O \cdot i_O + P_D$$

ove  $P_D$  è la potenza dissipata sotto forma di calore dall' amplificatore.

Un parametro molto importante è l' **efficienza**  $\eta$  dell' amplificatore, definita come la percentuale di potenza fornita dall' alimentatore che viene erogata al carico attraverso il morsetto di uscita ovvero:

$$\eta = \frac{P_o}{P_s} \times 100 \quad [\%]$$

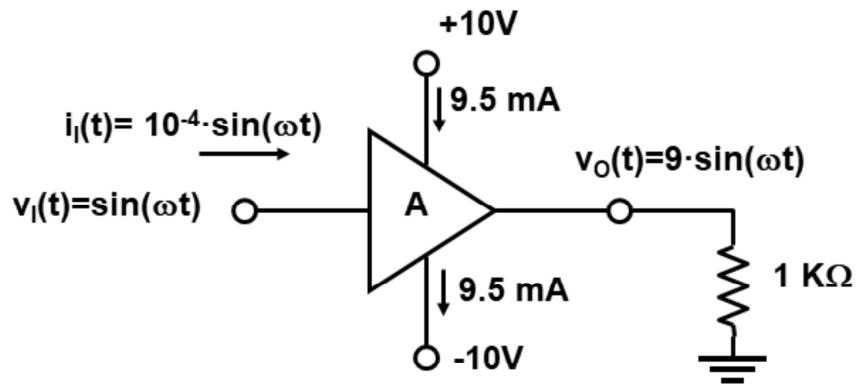
# Esempio 1



Valutare le potenze in ingresso, di uscita, di alimentazione e dissipata.

Calcolare il rendimento

## Esempio 2

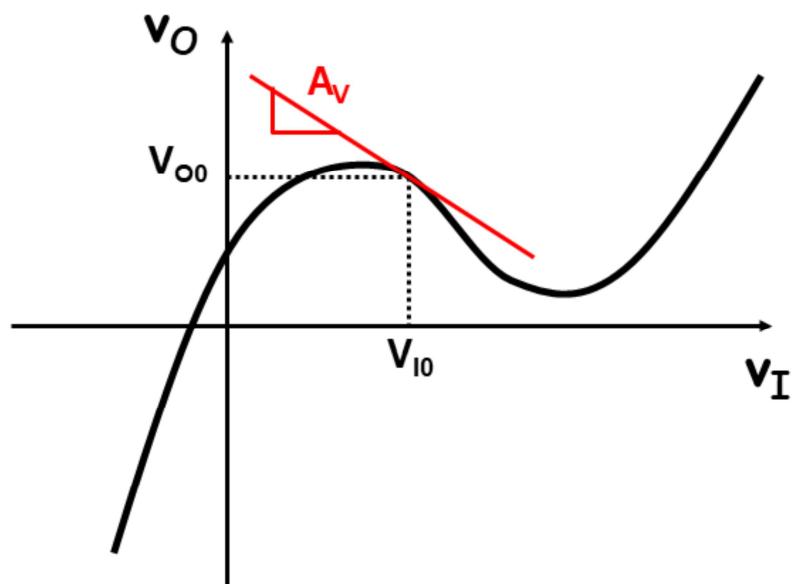


Valutare le potenze in ingresso, di uscita, di alimentazione e dissipata.

Calcolare il rendimento



## Caratteristica ingresso-uscita e Definizione di guadagno



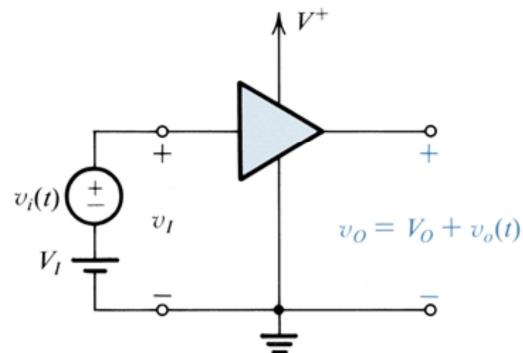
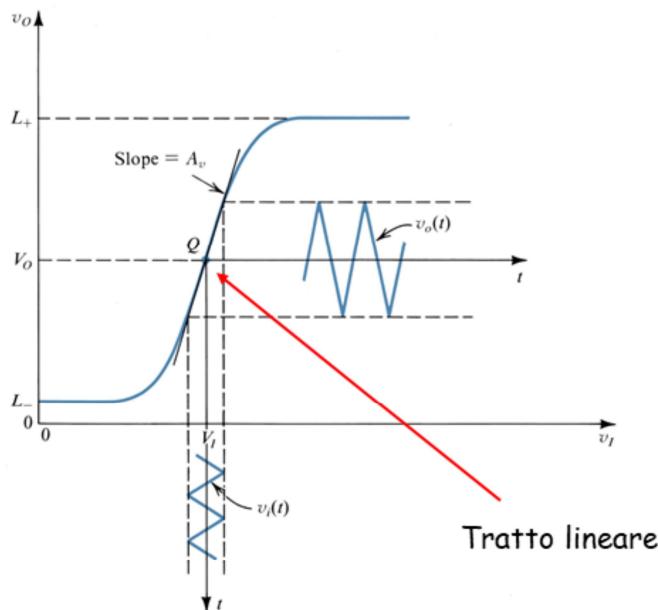
La caratteristica ingresso-uscita è rappresentata da una curva su un diagramma cartesiano che ha in ascissa la grandezza in ingresso ( $v_i$  nel caso di amplificatori in tensione) ed in ordinata la grandezza in uscita ( $v_o$ ).

Data la caratteristica I/O di un amplificatore, per esempio di tensione, il guadagno di tensione  $A_v$  è definito punto per punto come la derivata della caratteristica I/O fatta rispetto alla variabile  $v_i$

$$A_v = \frac{dv_o}{dv_i}$$

In generale il guadagno è quindi un concetto puntuale e può variare a seconda del valore della tensione in ingresso.

# Biasing



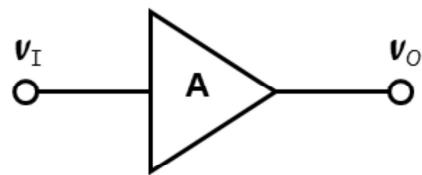
Molti amplificatori presentano un caratteristica il cui tratto ad alto guadagno non è centrato su valori di ingresso attorno allo zero.

In questo caso si ricorre alla **polarizzazione (biasing)** dell' ingresso. Questa tecnica consiste nel sommare al segnale di ingresso un valore fisso per poter operare nel tratto ad alto guadagno.

Analogamente, la tensione di uscita può assumere valori non nulli per segnali di ingresso nulli.



# Esempio



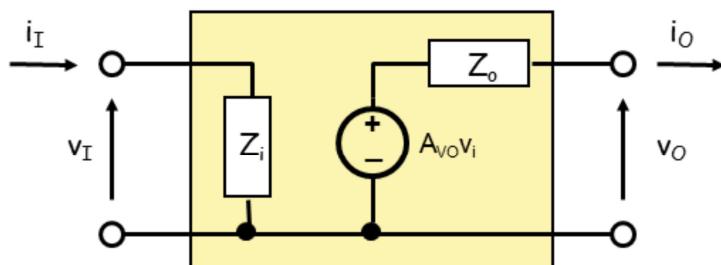
$$v_O = 10V^{-2} \cdot v_I^3 + 3V$$

Calcolare il guadagno in funzione di  $v_I$ .

Tracciare sul piano  $V_O - V_I$  la relazione ingresso-uscita.

Tracciare sul piano  $A_V - V_I$  l' andamento del guadagno.

# L' amplificatore lineare



**A<sub>vo</sub>** = guadagno di tensione a vuoto (Open circuit)

**Z<sub>i</sub>** = impedenza di ingresso

**Z<sub>o</sub>** = impedenza di uscita

Un amplificatore si dice lineare se può essere modellato come un doppio bipolo lineare e unilatero che ha cioè la proprietà di propagare un segnale dalla porta di ingresso a quella di uscita, ma non il contrario.

In altri termini **v<sub>O</sub>, i<sub>O</sub>** non influenzano **v<sub>I</sub>** ed **i<sub>I</sub>**

Unilatero  $\Rightarrow$  modello 3 parametri

Il modello a 3 parametri che viene utilizzato dipende solo dalla scelta delle grandezze di ingresso e di uscita (matematicamente sono equivalenti).

Il parametro "di trasmissione" caratterizza l'amplificatore

In generale **A<sub>VO</sub>** è funzione della pulsazione.

Le equazioni che legano le grandezze di ingresso ed uscita sono le seguenti:

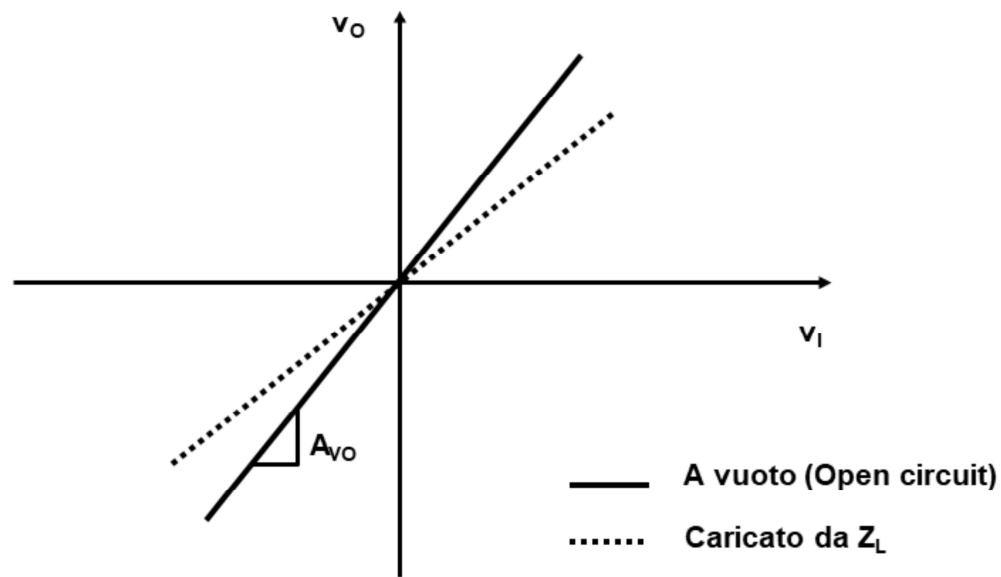
$$\begin{cases} v_I = Z_i \cdot i_I \\ v_O = A_{VO} \cdot Z_i \cdot i_I - Z_o \cdot i_O \end{cases}$$

Si può facilmente verificare che soddisfano le condizioni di linearità.

L'amplificatore lineare è una astrazione che permette di modellare un amplificatore che lavori nel tratto ad alto guadagno della propria caratteristica ed ammesso che in questo tratto il guadagno sia costante e l' offset nullo.



# Caratteristica ingresso-uscita



Un amplificatore lineare di tensione ha una caratteristica ingresso-uscita rappresentata da una retta passante per l'origine nel piano  $v_i$ - $v_o$ .

La relazione ingresso-uscita risulta:

$$v_o = A_V \cdot v_i$$

con  $A_V$  costante adimensionale corrispondente al guadagno in tensione.

Normalmente il guadagno in tensione di un amplificatore si indica in Decibel (dB) e risulta

$$A_{VdB} = 20 \cdot \log A_V$$

Se l' amplificatore non è ideale (impedenza di uscita non nulla) la caratteristica I-O varia al variare del carico.

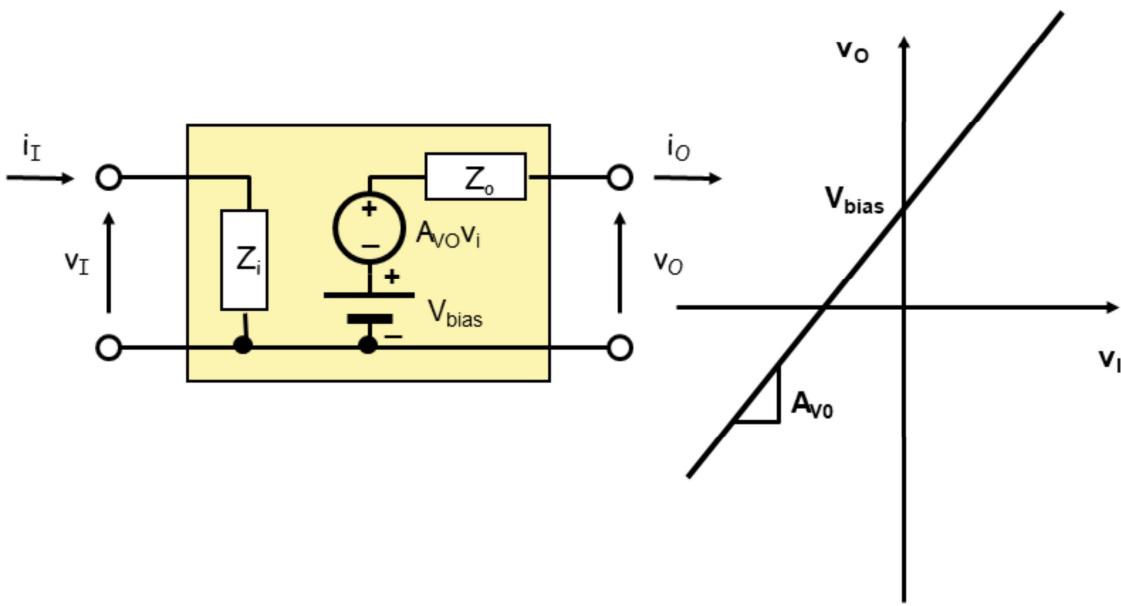
N.B. Anche se la caratteristica varia in funzione del carico, il parametro  $A_{vo}$  non cambia.

Esso infatti rappresenta il guadagno a vuoto (con carico nullo) dell' amplificatore.

In generale in presenza di carico non nullo risulta

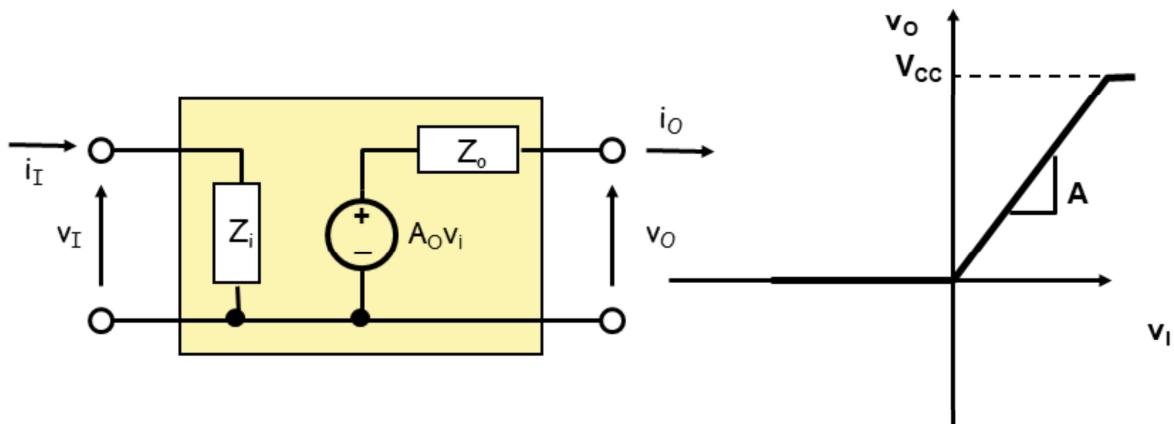
$$| v_o | \leq | A_{vo} \cdot v_i |$$

# Esempio di amplificatore non lineare



Un amplificatore che non presenta uscita nulla ad ingresso nullo (offset sull'uscita) non è un amplificatore lineare a causa della presenza di un generatore non comandato al suo interno

# Voltage Swing



La tensione in uscita da un amplificatore lineare reale può assumere valori all' interno dell' intervallo definito dalle alimentazioni.

Nel caso di alimentazione singola la massima escursione (**swing**) della tensione di uscita è al più **[0.. $V_{cc}$ ]**.

Il segnale in uscita è quindi sempre positivo o nullo.

Nel caso particolare mostrato in figura si riconoscono quindi tre tratti della caratteristica in cui il guadagno vale:

- 1) Per  $v_I < 0$  il guadagno è nullo  $\rightarrow A_v = 0$ .
- 2) Per  $0 < v_I < V_{cc}/A$  il guadagno vale  $A \rightarrow A_v = A$
- 3) Per  $v_I > V_{cc}/A$  il guadagno è nullo  $\rightarrow A_v = 0$ .

Il guadagno risulta quindi costante a tratti.

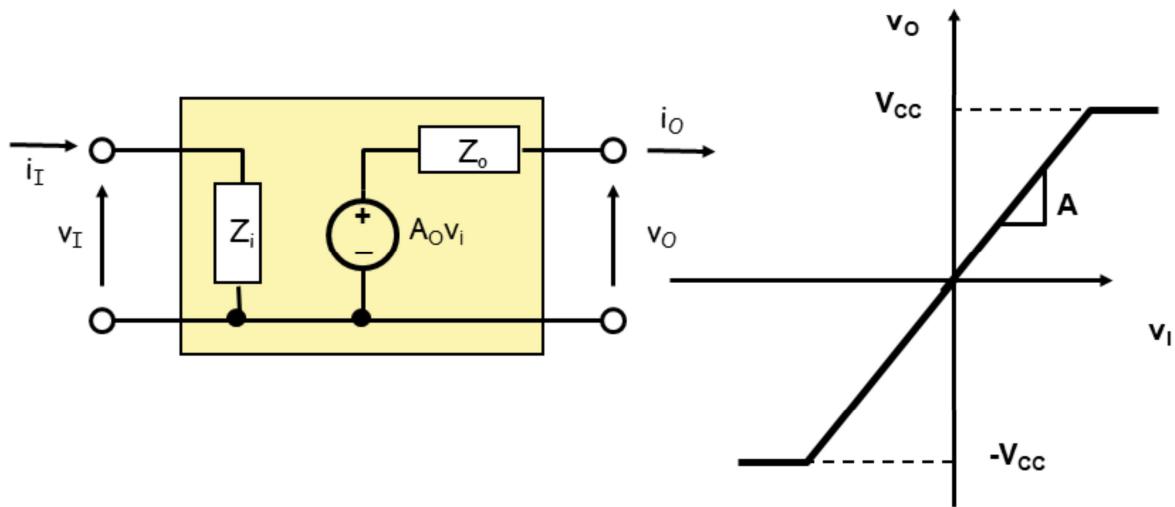
Il tratto a guadagno  $A_v = A$  verrà denominato tratto ad alto guadagno.

## Saturazione:

Nei tratti con guadagno nullo, l' amplificatore raggiunge il limite minimo e massimo della tensione di uscita. Per ogni valore di tensione in ingresso in questo tratto, l' uscita rimane ad una tensione costante. L' amplificatore perde quindi la proprietà di trasferire l' informazione associata al segnale di ingresso verso l' uscita.

Quando l' amplificatore entra in questo tratto della caratteristica si dice che entra in **saturazione** o anche che si raggiunge il **clipping** dell' uscita. Il modello più appropriato in questo tratto è un generatore di tensione **non comandato**. Di conseguenza in queste condizioni l' Amplificatore perde la proprietà di linearità.

# Voltage Swing



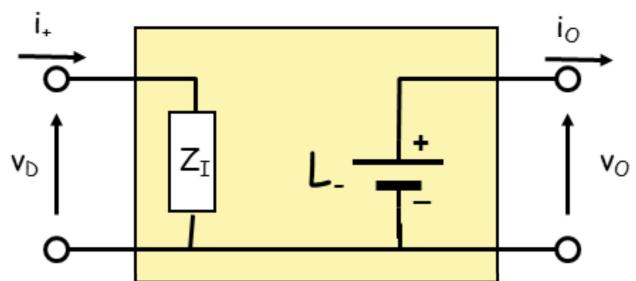
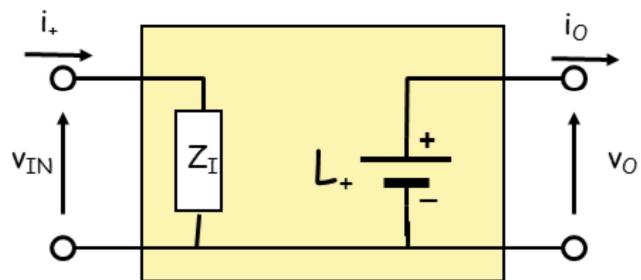
Se si desidera amplificare segnali bipolari (es. sinusoidi a valore medio nullo), è necessario fornire una doppia alimentazione (o **duale**) anche se le tensioni in ingresso ed uscita saranno comunque riferite a massa.

In questo caso lo swing sarà al più [-V<sub>cc</sub>..+V<sub>cc</sub>].

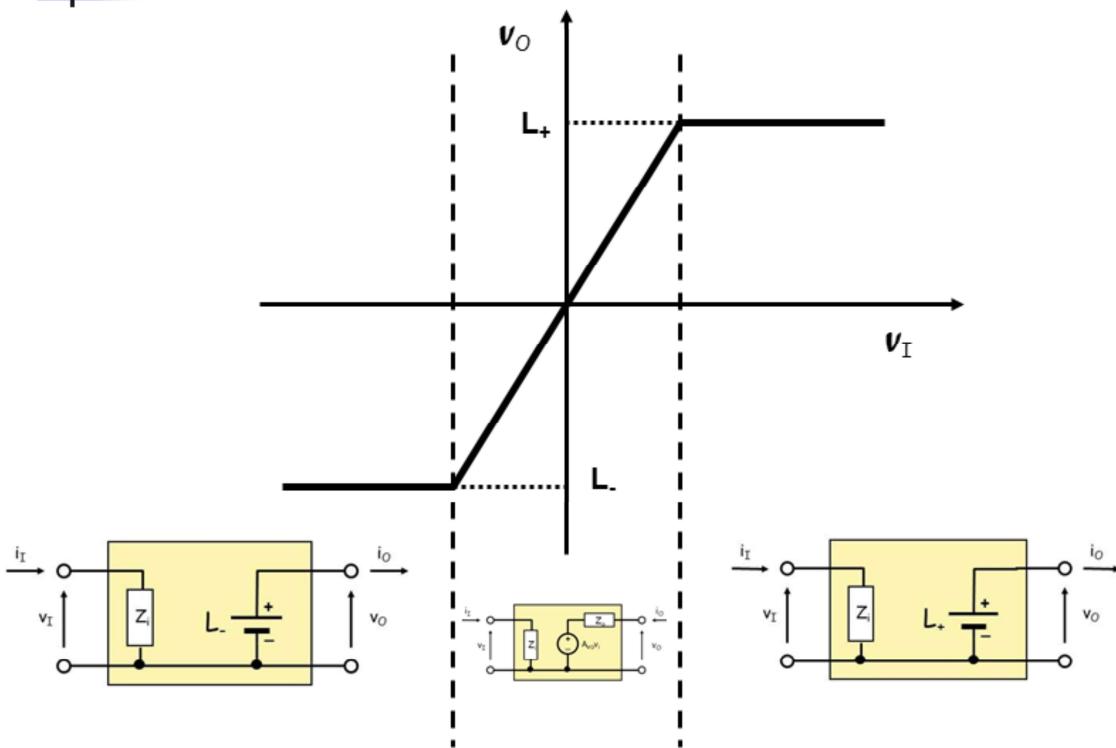
Si noti che al di fuori di questo intervallo l' amplificatore entra in saturazione, la sua uscita assume un valore costante ed il guadagno si annulla.

Come già detto, in queste condizioni il modello non è più quello dell' amplificatore lineare ma più propriamente sarà quello di un generatore di tensione non comandato.

# Modelli in saturazione



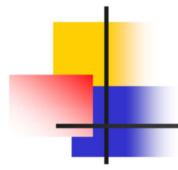
# Modelli....



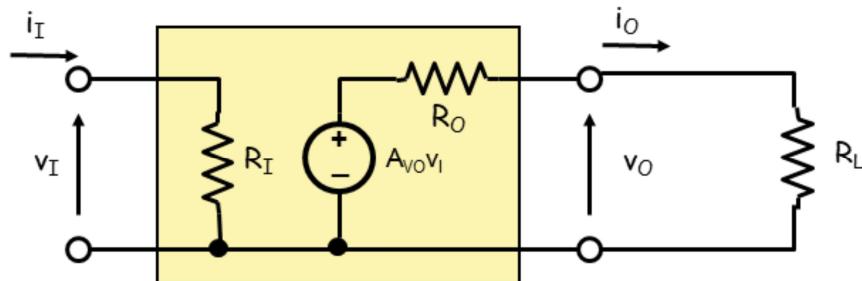
Un amplificatore che abbia una caratteristica I/O del tipo riportato nella slide precedente, può essere rappresentato da un modello che dipende dalla regione di funzionamento.

Per tensioni di ingresso che cadono nella zona di alto guadagno, il modello da usare sarà quello dell' amplificatore lineare.

Per tensioni al di fuori di questo intervallo, l' amplificatore si comporta come un generatore di tensione non controllato e come tale deve essere modellato.



# Effetto del carico



Consideriamo un amplificatore di tensione di cui supporremo, per semplicità, reali, finite e non nulle le impedenze di ingresso ed uscita.

Il guadagno in tensione  $A_V$  dipende dal valore del carico che, ancora per semplicità, supporremo reale.

La tensione in uscita  $v_O$  si può calcolare facilmente come tensione al nodo intermedio del partitore  $R_O-R_L$

$$v_O = A_{V0} v_I \frac{R_L}{R_L + R_O}$$

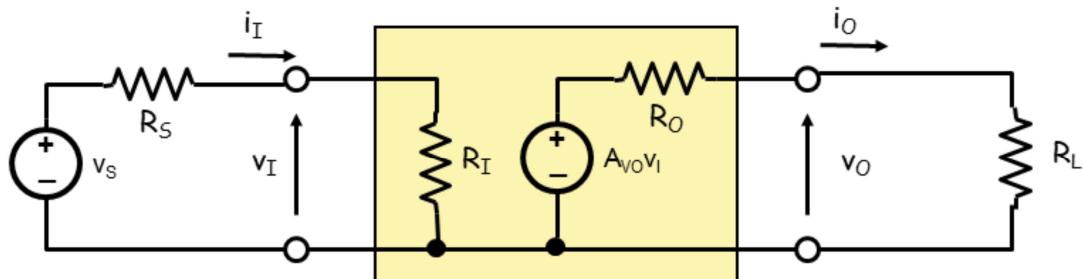
Il guadagno  $A_V$  si può facilmente calcolare applicando la definizione nel caso di amplificatore lineare:

$$A_V = \frac{dv_O}{dv_I} = A_{V0} \frac{R_L}{R_L + R_O} < A_{V0}$$

Nel progetto di un amplificatore risulta quindi molto importante valutare con attenzione le condizioni di carico per poter dimensionare  $R_O$  in modo che il guadagno non venga ridotto sensibilmente.  $R_O$  deve essere sufficientemente piccola rispetto al valore minimo di  $R_L$  in modo che risulti  $A_V \approx A_{V0}$



# Effetto di $R_I$



Un ulteriore riduzione del valore del guadagno si ha se la resistenza di ingresso  $R_I$  è di valore confrontabile con la resistenza di uscita del generatore di segnale collegato all' ingresso dell' amplificatore.

Risulta infatti:

$$v_I = v_s \frac{R_I}{R_I + R_s}$$

Se  $R_I$  non è sufficientemente grande rispetto ad  $R_s$  si ha un ulteriore riduzione del guadagno complessivo.:

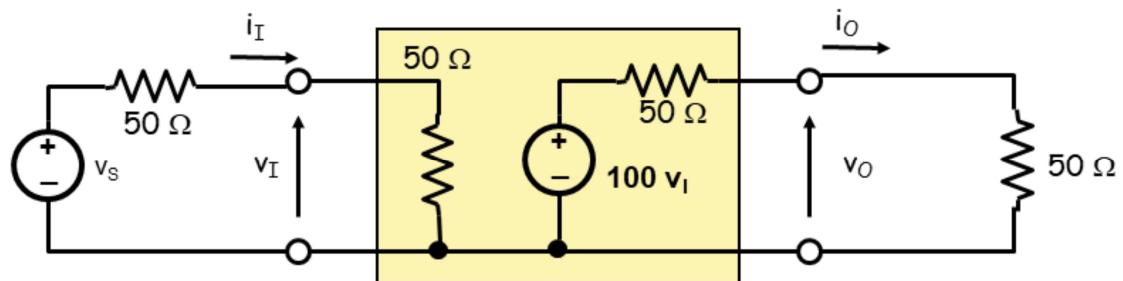
Combinando le relazioni scritte in precedenza risulta:

$$v_o = A_{VO} v_I \frac{R_L}{R_L + R_O} = A_{VO} v_s \frac{R_L}{R_L + R_O} \frac{R_I}{R_I + R_s}$$

Un amplificatore di tensione deve quindi tipicamente presentare una alta impedenza di ingresso ed una bassa impedenza di uscita.

Un amplificatore *ideale* di tensione ha impedenza di ingresso infinita e impedenza di uscita nulla. In queste condizioni, il guadagno  $A_v$  è massimo (e corrisponde a  $A_{VO}$ ) per ogni condizione di carico e di resistenza di uscita della sorgente di segnale.

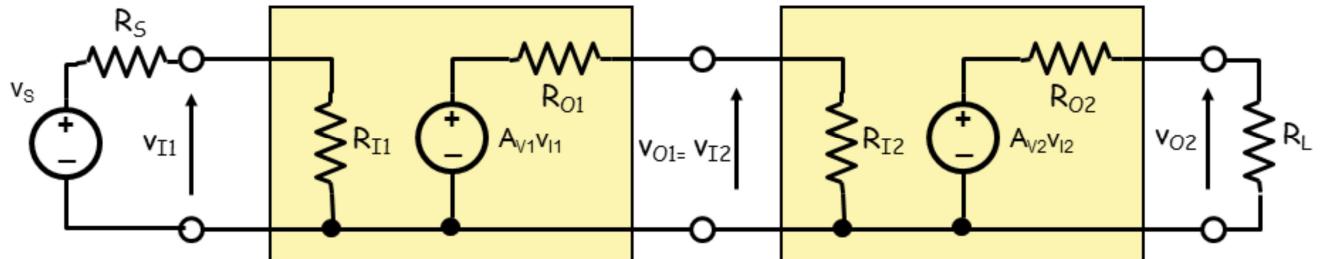
# Esempio



Calcolare il guadagno di tensione  $A_V$



# Amplificatori multistadio



Una immediata estensione delle considerazioni appena fatte è il calcolo del guadagno di un insieme di amplificatori di tensione collegati in cascata.

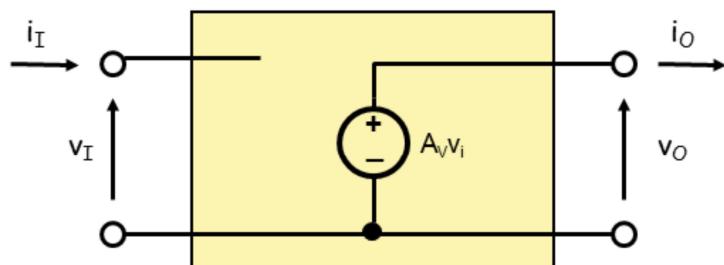
Risulta infatti:

$$v_{O2} = v_s \frac{R_{I1}}{R_{I1} + R_S} A_{V1} \frac{R_{I2}}{R_{I2} + R_{O1}} A_{V2} \frac{R_L}{R_L + R_{O2}}$$

In generale, la cascata di  $n$  stadi amplificatori lineari in tensione equivale ad un amplificatore con guadagno complessivo pari a:

$$A_V = \left[ \prod_{i=1}^n A_{Vi} \frac{R_{Ii}}{R_{Ii} + R_{O(i-1)}} \right] \frac{R_L}{R_L + R_{On}} \quad \text{con} \quad R_{o(0)} = R_S$$

# L' amplificatore lineare ideale



$A_V$  = guadagno di tensione costante indipendente da  $\omega$

$Z_i$  = impedenza di ingresso =  $\infty$

$Z_o$  = impedenza di uscita = 0

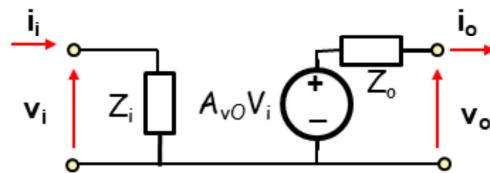
Un amplificatore lineare ideale di tensione ha le seguenti caratteristiche:

- Guadagno costante  $A_V$  indipendente dalla pulsazione (banda infinita)
- Impedenza di ingresso infinita
- impedenza di uscita nulla

# Tipi di amplificatore

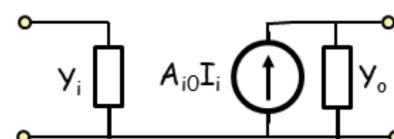
- **Amplificatore di tensione**

- Se ideale:  $Z_i = \infty$ ,  $Z_o = 0$
- Guadagno  $A_{vO} = dv_o/dv_i @ i_o = 0$



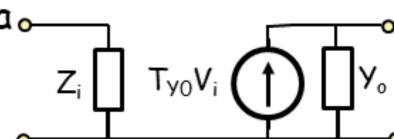
- **Amplificatore di corrente**

- Se ideale:  $Y_i = \infty$ ,  $Y_o = 0$
- Guadagno  $A_{iO} = di_o/di_i @ v_o = 0$



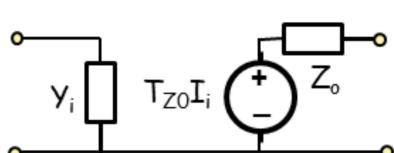
- **Amplificatore a transammettenza**

- Se ideale:  $Z_i = \infty$ ,  $Y_o = 0$
- Guadagno  $T_{yO} = di_o/dv_i @ v_o = 0$



- **Amplificatore a tranimpedenza**

- Se ideale:  $Y_i = \infty$ ,  $Z_o = 0$
- Guadagno  $T_{zO} = dv_o/di_i @ i_o = 0$



Oltre agli amplificatori lineari di tensione finora considerati, esistono altri tipi di amplificatori che differiscono per le grandezze considerate come segnali di ingresso e di uscita.

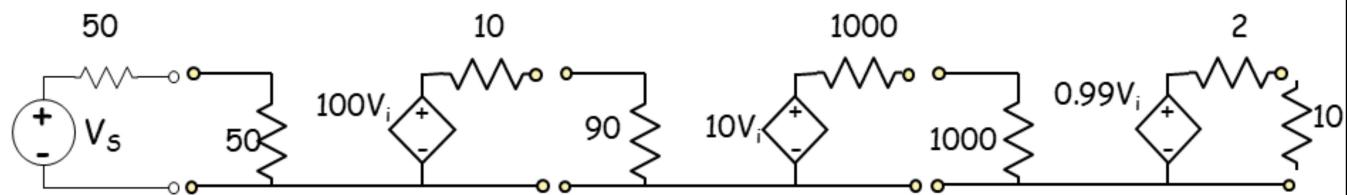
Dualmente a quanto definito per l' amplificatore di tensione, il massimo guadagno di corrente di un amplificatore di corrente si ottiene con l' uscita in cortocircuito. Questo è intuitivo se si considera che per ogni valore della resistenza di carico diverso da zero, una parte della corrente fornita dal generatore fluisce sulla ammettenza di uscita  $Y_o$  e non sul carico. Tale corrente è tanto più elevata (e quindi il guadagno effettivo tanto più basso), quanto più elevata è  $Y_o$ . Per un amplificatore in corrente ideale  $Y_o$  è quindi nulla.

Un ragionamento analogo deve essere fatto riguardo l' ammettenza di ingresso nel caso di ingresso in corrente. In questo caso la corrente erogata dal generatore di segnale (non ideale) scorre interamente all' ingresso dell' amplificatore solo se l' ammettenza di ingresso è infinita.

Per quanto riguarda gli amplificatori a transresistenza e transconduttanza valgono considerazioni analoghe. Va inoltre notato che in questi casi il guadagno non è adimensionale come nel caso degli amplificatori di tensione e corrente.

# Esempio: amplificatore a 3 stadi

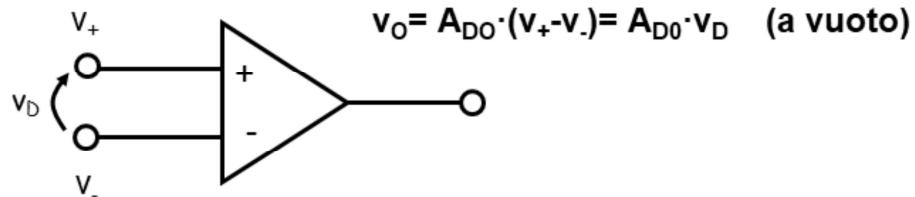
## ■ Amplificatore di tensione a 3 stadi



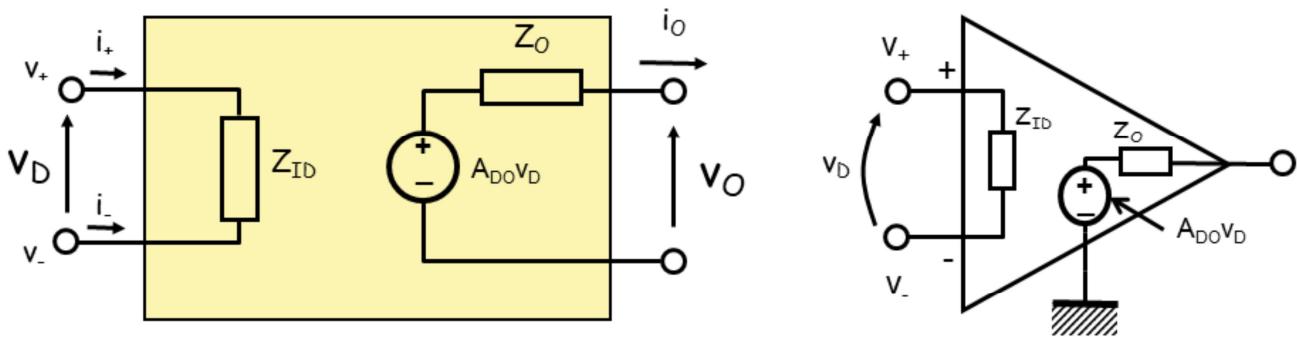
Calcolare il guadagno di tensione

# Amplificatori differenziali lineari

Simbolo :



Modello nella zona ad alto guadagno:



Gli amplificatori differenziali lineari sono particolari amplificatori lineari che presentano due morsetti di ingresso ed uno di uscita.

La tensione in uscita dipende dalla **differenza** dei segnali in ingresso ( $v_+ - v_-$ ) secondo  **$A_{DO}$  (guadagno differenziale a vuoto)**

E quindi in particolare a vuoto vale :

$$v_O = A_{DO} \cdot (v_+ - v_-)$$

o, per semplicità :

$$v_O = A_{DO} \cdot v_D$$

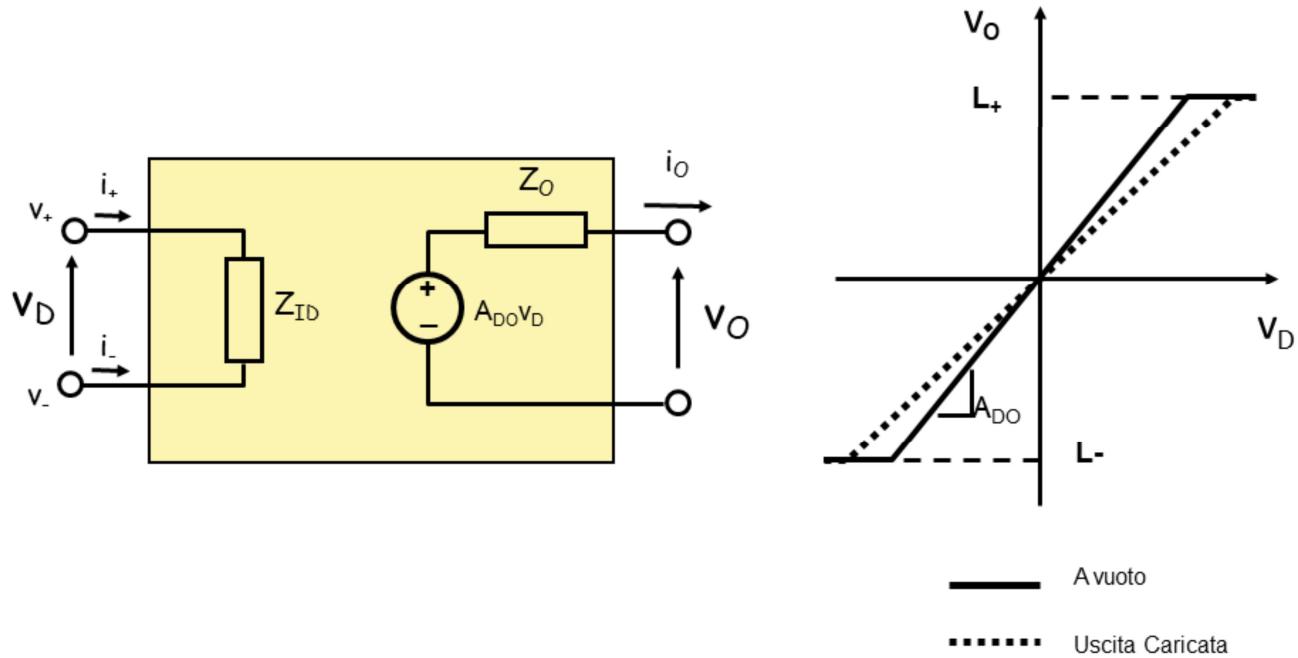
definendo :

$$v_D = v_+ - v_-$$

**tensione differenziale applicata agli ingressi**

Come si può vedere anche l' amplificatore differenziale è un amplificatore lineare unilatero.

# Amplificatore differenziale (reale)



Anche in un amplificatore differenziale reale, il guadagno  $A_D$  dipende dalle condizioni di carico.

Inoltre, come nel caso dell' amplificatore single-ended, lo swing della tensione di uscita è limitato all' intervallo  $[L_- - L_+]$

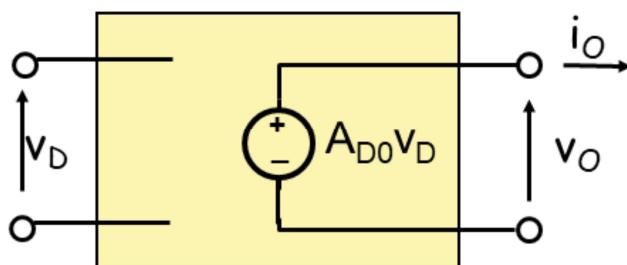
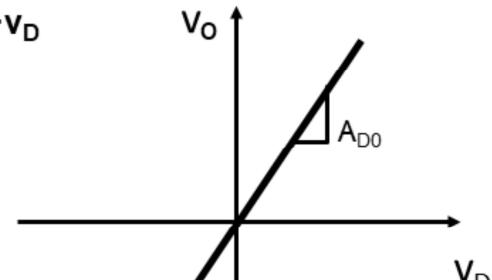
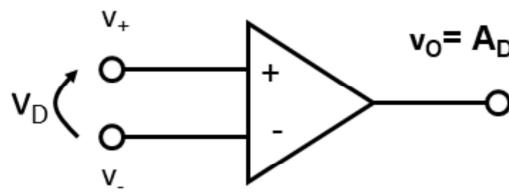
### Esercizio.

Si consideri un amplificatore differenziale con guadagno  $A_{D0}=10$ , impedenza di uscita  $Z_O=50\Omega$  con alimentazione singola  $V_{CC}=15V$ . Sia  $L_- = 0V$  ed  $L_+=V_{CC}$ .

Riempire la seguente tabella:

		$Z_L=\infty$	$Z_L=150\Omega$
$v_+$	$v_-$	$v_O$	$v_O$
0V	0V		
1V	1V		
1V	0V		
0V	1V		
-1V	5V		
2V	0.2V		

## Amplificatore differenziale lineare ideale



In un amplificatore differenziale, il segnale in ingresso è rappresentato dalla differenza  $v_D$  fra le tensioni in ingresso  $v_+$  e  $v_-$  :

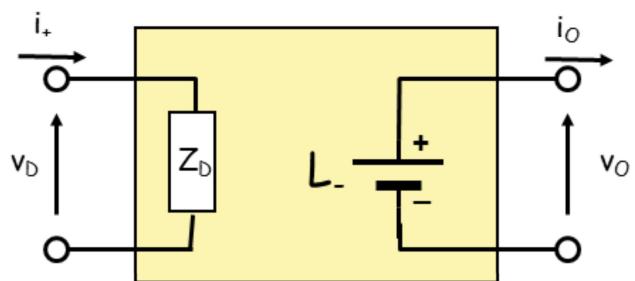
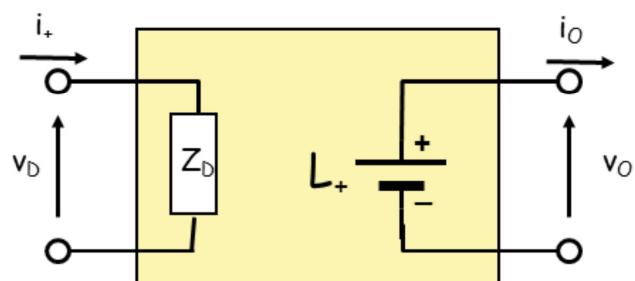
$$v_D = v_+ - v_-$$

Si indica quindi come caratteristica ingresso uscita la curva  $v_O - v_D$ .

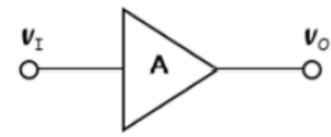
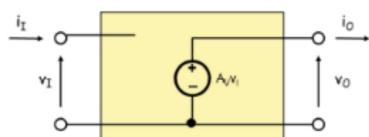
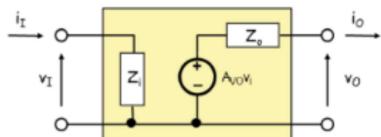
Anche per l' amplificatore differenziale lineare nel caso **ideale** si ha:

- Guadagno differenziale a vuoto costante  $A_{D0}$
- Impedenze di ingresso infinite
- impedenza di uscita nulla

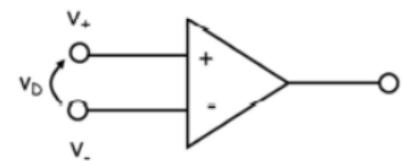
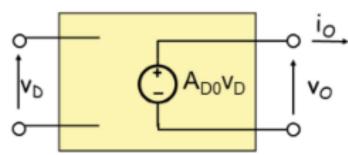
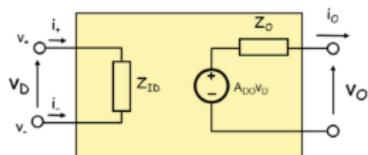
# Modelli in saturazione



# Amplificatori lineari



$$v_O = A_V \cdot v_I$$



$$v_O = A_{D0} \cdot (v_+ - v_-) = A_{D0} \cdot v_D$$